

Комаров Р.С., аспирант
Палкин В.А., проф., д-р техн. наук

ФОРМУЛЫ РАСЧЕТА СОДЕРЖАНИЯ МИНОРНЫХ ИЗОТОПОВ ДЛЯ ПЯТИПОТОЧНЫХ КАСКАДОВ

При получении обогащенного урана для атомной энергетики на разделительных каскадах требуется расчет концентраций минорных изотопов урана – ^{234}U , ^{236}U , ^{232}U . Вследствие сложности определения начальных приближений для задачи оптимизации процесса разделения урана имеется необходимость предварительной оценки содержания минорных изотопов в отбираемых из каскада потоках.

Полученные в данной работе формулы в предельном случае переходят в соотношения, представленные А.И. Израилевичем на конференции «Физико-химические процессы при селекции атомов и молекул» для трехпоточного каскада. В отличие от численной процедуры расчета, предложенной тем же автором для более общего случая пятипоточных каскадов, эти формулы позволяют провести вычисления в аналитическом виде.

Рассмотрим идеальный каскад с двумя отборами и двумя питаниями. Данный каскад определяется следующими внешними параметрами: потоками первого (основного) и второго (промежуточного) отборов P_1 и P_2 , первого и второго питания F_1 и F_2 и отвала W , а также концентрациями изотопов в первом и втором отборах, первом и втором питании и отвале: $C_i^P, C_i^R, C_i^{F_1}, C_i^{F_2}, C_i^W$ – соответственно (примем i равной последней цифре атомного веса изотопа урана $23i$, $i = 5$ для ^{235}U и т.п.).

Будем считать, что величины потоков отбора и питания связаны соотношениями:

$$P_1/P_2 = \varphi, \quad F_1/F_2 = \lambda,$$

где φ и λ – коэффициенты, определяемые конструкцией каскада.

Пусть заданы концентрации целевого и минорных изотопов в первом и втором питаниях, концентрации целевого изотопа в первом и втором отборах и отвале, а также величина потока первого отбора и значения конструктивных параметров φ и λ . Найдем значения концентраций минорных изотопов в первом и втором отборе и отвале, считая, что концентрации минорных изотопов много меньше концентрации целевого изотопа.

Для минорных изотопов можно получить следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{dC_m}{dC} = \frac{2C_m}{C} \left(1 - \frac{\Delta\mu}{3(1-C)} \right) - \frac{P_1(C_m^P - C_m) + P_2(C_m^R - C_m) - F_1(C_m^{F_1} - C_m)}{P_1(C^P - C) + P_2(C^R - C) - F_1(C^{F_1} - C)}$$

Данное уравнение имеет следующее частное решение (начальные условия находятся из условия непрерывности концентраций во всех точках каскада):

$$C_m = \frac{(P_1 C_m^{F_1} + P_2 C_m^{F_2} - F_1 C_m^{F_1}) C^2 \left(\frac{1-C}{C} \right)^{\left(\frac{2}{3} \Delta \mu_m \right)}}{\left(P_1 (C^{F_1} - C) + P_2 (C^{F_2} - C) - F_1 (C^{F_1} - C) \right) \left(1 - \frac{2}{3} \Delta \mu_m \right) \left(\left(\frac{1-C}{C} \right)^{\left(1 - \frac{2}{3} \Delta \mu_m \right)} - \right. \\ \left. - \left(\frac{1 - C_m^{F_1}}{C_m^{F_1}} \right)^{\left(1 - \frac{2}{3} \Delta \mu_m \right)} \right) \left(1 - \frac{\tilde{C}_m^{F_1} \left(1 - \frac{2}{3} \Delta \mu_m \right) (P_1 (C^{F_1} - C^{F_1}) + P_2 (C^{F_2} - C^{F_1}))}{C^{F_1} (1 - C^{F_1}) (P_1 C_m^{F_1} + P_2 C_m^{F_2} - F_1 C_m^{F_1})} \right)}.$$

Это уравнение определяет зависимость концентрации минорных изотопов от концентрации целевого изотопа на участке между точками подачи питания каскада. Аналогично можно найти зависимости на участках между первым и вторым отбором, между первым питанием и вторым отбором, между вторым питанием и отвалом.

Из условий непрерывности концентраций в точках подачи питания и точке второго отбора получаем следующие отношения концентраций:

$$C_m^{F_1} = \alpha \tilde{C}_m^{F_1}, \quad C_m^{F_2} = \beta \tilde{C}_m^{F_1}, \quad C_m^W = \delta \tilde{C}_m^{F_1} + \varepsilon C_m^{F_1} + \zeta C_m^{F_2} + \eta,$$

где $\tilde{C}_m^{F_1}$ – значение концентрации минорного изотопа в точке подачи первого питания (с концентрациями целевого и минорного изотопа C^{F_1} и $C_m^{F_1}$, соответственно).

Подставляя данные соотношения в уравнение баланса по целевому изотопу получаем уравнение:

$$((\alpha\varepsilon + \zeta\beta + \delta)W + \alpha P_1 + \beta P_2) \tilde{C}_m^{F_1} + \eta W = C_m^{F_1} F_1 + C_m^{F_2} F_2,$$

решая которое находим $\tilde{C}_m^{F_1}$:

$$\tilde{C}_m^{F_1} = \frac{C_m^{F_1} F_1 + C_m^{F_2} F_2 - \eta W}{((\alpha\varepsilon + \zeta\beta + \delta)W + \alpha P_1 + \beta P_2)}.$$

Значения неизвестных потоков первого и второго отбора и отвала могут быть найдены по формулам:

$$F_1 = \frac{P_1 (C^{F_1} + \varphi C^{F_2} - (1 + \varphi) C^W)}{C^{F_1} + \lambda C^{F_2} - (1 + \lambda) C^W}, \quad F_2 = \frac{\lambda P_1 (C^{F_1} + \varphi C^{F_2} - (1 + \varphi) C^W)}{C^{F_1} + \lambda C^{F_2} - (1 + \lambda) C^W}, \\ W = \frac{P_1 ((1 + \lambda) (C^{F_1} + \varphi C^{F_2}) - (1 + \varphi) (C^{F_1} + \lambda C^{F_2}))}{C^{F_1} + \lambda C^{F_2} - (1 + \lambda) C^W}.$$